·综述与专论·

医工结合的中医手法治疗脊柱退行性疾病疗效机制研究思路与前景

王旭[1]，魏戌[1，2*]，朱立国[1，2*]，冯天笑[1，3]，王志鹏[4]，师彬[5]

【摘要】 脊柱退行性疾病是目前骨伤科临床最为常见的病种之一，也是中医骨伤科学的主要优势病种。中医手法是中医骨伤科学治疗该类疾病的常用手段，但现阶段中医手法疗效机制研究的仍不够深入，阻碍了手法研究的现代化进程与国际化推广。医工结合是近年来相关科学技术进步与中医药现代化需求相结合而产生的全新研究思路，有助于实现中医手法疗效机制研究现代化，促进中医手法的国际化推广。本文将从中医手法研究中机械工程技术、软件工程技术、神经工程技术及人工智能技术等现代工程技术的应用现状为思路，梳理近年来“医工结合”研究模式下中医手法疗效机制现代化研究，为后续手法治疗脊柱退行性疾病的疗效机制研究提供参考。

【关键词】 脊柱疾病；肌肉骨骼手法；中医手法；脊柱退行性疾病；医工结合；中医药现代化；综述

【中图分类号】 R 681.5 【文献标识码】 A DOI：10.12114/j.issn.1007-9572.2023.0182

【引用本文】 王旭，魏戌，朱立国，等.医工结合的中医手法治疗脊柱退行性疾病疗效机制研究思路与前景［J］.中国全科医学，2023.DOI：10.12114/j.issn.1007-9572.2023.0182.［www.chinagp.net］

WANG X，WEI X，ZHU L G，et al. Research ideas of the efficacy mechanism and prospect analysis of Traditional Chinese manipulative therapyon treating spinal degenerative diseases with combination of medicine and industry［J］. Chinese General Practice，2023.

Research Ideas of the Efficacy Mechanism and Prospect Analysis of Traditional Chinese Manipulative Therapyon Treating Spinal Degenerative Diseases with Combination of Medicine and Industry

WANG Xu[1]，*WEI Xu*[1，2*]，*ZHU Liguo*[1，2*]，*FENG Tianxiao*[1，3]，*WANG Zhipeng*[4]，*SHI Bin*[5]

1.Wangjing Hospital of China Academy of Chinese Medical Sciences，Beijing 100102，China

2.Beijing Key Laboratory of TCM Bone Setting，Beijing 100102，China

3.Beijing University of Chinese Medicine，Beijing 100029，China

4.Beihang University，Beijing 100083，China

5.Shandong University of Traditional Chinese Medicine，Ji´nan 250062，China

**Corresponding authors：WEI Xu，Researcher；E-mail：weixu.007@163.com*

ZHU Liguo，Chief Physician；E-mail：zhlg95@aliyun.com

【Abstract】 Spinal degenerative diseasesare currently most common clinical conditions and alsodominant diseases in the field of traumatology and orthopedics. Traditional Chinese manipulative therapyis a commonapproach for spinal degenerative diseases in traumatology and orthopedics of Chinese medicine. However，the current researches on the efficacy mechanism of traditional Chinese manipulative therapy is still not deep enough，which hinders the modernization and internationalization of the study on the manipulative therapy. Combination of medicine and industry is a novel research idea generated by the combination of relevant scientific and technological progress and the modernization of traditional Chinese medicine in recent years，which is helpful to realize the modernization of the research on the efficacy mechanism of traditional Chinese manipulative therapy and promote the internationalization of traditional Chinese manipulative therapy. Using the application status of modern engineering technologies such as mechanical engineering technology，software engineering technology，neural engineering technology and artificial intelligence technology in the research of traditional Chinese manipulative therapyas research ideas，this paper sorts

基金项目：北京市科技新星计划（Z191100001119025）；北京市科技新星交叉合作课题（20220484228）；山东省重点研发计划（重大科技创新工程）项目（2022CXGC020510）

1. 100102 北京市，中国中医科学院望京医院 2. 100102 北京市，中医正骨技术北京市重点实验室 3. 100029 北京市，北京中医药大学 4. 100083 北京市，北京航空航天大学 5. 250062 山东省济南市，山东第一医科大学附属颈肩腰腿痛医院

*通信作者：魏戌，研究员；E-mail：weixu.007@163.com 朱立国，主任医师；E-mail：zhlg95@aliyun.com

out the researches on the modernization on the efficacy mechanism of traditional Chinese manipulation under the "combination of medicine and industry" research model in recent years, in order to provide reference ideas for the subsequent researches of the efficacy mechanism of manipulation in the treatment of spinal degenerative diseases.

【Key words】 Spinal diseases; Musculoskeletal manipulations; Chinese manipulative therapy; Spinal degenerative disease; Combination of medicine and industry; Modernization of traditional Chinese medicine; Review

脊柱退行性疾病是骨科临床常见的骨与关节退行性疾病之一，也是目前影响中老年人生活质量的一大公共卫生问题[1]。一项全球性的流行病学调查研究显示，2017 年全球共有约 2.887 亿人罹患颈痛，并导致约 2 860 万例患者残疾，我国则是该病该年度全球国家年龄标准化年发病率较高的国家之一，达到 1037.7 例 /10 万人年，位列全球第八[2]；而我国在 2019 年的腰痛患者标准化年发病期望人数则达到了 5134.7 例 /10 万人年，位列全球第五，同样是全球腰痛负担较高的国家之一[3]。脊柱退行性疾病可造成患者颈腰部疼痛与功能障碍，且易迁延反复，对患者生活质量有较大的影响，而目前外科治疗相较于保守治疗不仅具有一定风险性，还有较高的复发、二次手术可能性[4]。因此，寻找一种疗效确切、价格低廉且安全性更高的治疗手段是十分必要的。

中医手法是治疗脊柱退行性疾病的常用手段之一[5]。研究表明，中医手法治疗脊柱退行性疾病不仅疗效明确[6-8]，同时相较于手术治疗具有操作简便、便于实施、价格低廉的特点，尤其是远期经济效益优于外科手术疗法[9]，适宜于在骨科临床工作中推广应用，减轻患者医疗经济负担。但现阶段，对于中医手法治疗各类脊柱退行性疾病的疗效机制研究仍不够深入，且相对缺乏现代科学技术解析，在一定程度上阻碍了手法疗效机制研究的现代化进程，并影响了手法的国际化推广及临床应用。如何以现代科学技术为抓手，实现中医手法研究的数字化、现代化，促进中医手法的国际化推广，是目前该领域急需解决的问题。

“医工结合”研究模式是近年来相关科学技术进步与中医药现代化需求相结合而产生的全新研究思路，其倡导各学科间打破壁垒，交叉融合，以解决医学研究的问题为核心目标，围绕实际需求进行协同创新，充分发挥协同学科的优势，最终取得“1+1>2”的研究效果[10]。习近平总书记在 2021 年考察河南南阳医圣祠时明确指出：“我们要发展中医药，注重用现代科学解读中医药学原理，走中西医结合的道路”。《“健康中国 2030”规划纲要》中亦指出：应“全面促进中医药现代化进程，开展中医智慧医疗工作具有得天独厚的优势和发展机遇”。中医药现代化是未来中医药研究发展的主要方向，中医手法研究的现代化离不开现代科学技术的加持。基于此现状，本文以中医手法治疗脊柱退行性疾病的疗效机制研究为切入点，梳理“医工结合”研究模式在该领域的实施现状及策略，以期明确下一阶段该领域的研究方向，为该领域科研工作人员提供一定的参考。

1 文献检索策略

本研究检索了近五年包括中国知网（CNKI）、中国生物医学文献数据库（CBM）、万方数据知识服务平台、维普中文期刊服务平台（VIP）在内的中文数据库及包括 PubMed、Web of Science、Embase 在内的英文数据库中发表的相关研究论述，检索时间设置为 2017-01-01—2023-02-01，同时纳入少量早期的经典文献及论述学科定义及内容的重要文献。中文检索关键词为“中医手法”“推拿”“医工结合”“机器人”“中枢”“生物力学”“人工智能”等，英文检索词包括“Traditional Chinese Medical Manipulation”“Manipulation”“Spinal Manipulation”“Massage”“Manuel Therapy”“Mobilization”“Medical engineering”“Robot”“Neuroengineering”“Software”“Neural Engineering”“Artificial intelligence” 等。以 PubMed 数据库为例，本研究构建的检索式：（“Traditional Chinese Medical Manipulation”［Title/Abstract］OR “Manipulation”［Title/Abstract］OR “Spinal Manipulation”［Title/Abstract］OR “Massage”［Title/Abstract］OR “Manuel Therapy”［Title/Abstract］OR “Mobilization”［Title/Abstract］）AND（“Medical engineering”［Title/Abstract］OR “Robot”［Title/Abstract］OR “Neuroengineering”［Title/Abstract］OR “Software”［Title/Abstract］OR “Neural Engineering”［Title/Abstract］OR “Artificial intelligence”［Title/Abstract］）。检索完成后，依据纳排标准进行文献筛选，其中纳入标准为：（1）以手法或手法模拟设备为干预措施，且涉及手法治疗脊柱退行性疾病（主要包括：颈椎病、腰椎间盘突出症、腰椎滑脱、椎管狭窄等）机制研究的相关文献；（2）论点、论据真实可靠，与主题关联度高的文献。排除标准：（1）与主题相关性不高的文献；（2）逻辑严谨性、可信度较低的文献。最终纳入相关文献 54 篇。

2 机械工程技术的应用

机械工程技术在医学研究中已有广泛应用，在中医手法研究方面尤为明显。目前，已有许多研究者探索了相关技术设备在中医手法临床实践中的应用方法。如：

为解决推拿科医生长时间进行手法操作导致的疲劳和疗效下降等问题，多位研究者开展了推拿手法机械臂、机器人等的研究和探索[11-13]；为实现中医手法传承的标准化，有研究通过研发手法教学机器人及配套手法教学考核系统，以机器人采集的力学曲线及相关参数评估学员旋提手法操作的可靠性，较好地实现了旋提手法教学考核的标准化、数字化[14-15]。

此外，相关技术设备在手法治疗疗效机制研究方面的应用是近年来的热门之一，主要用于动物实验中的手法干预疗效模拟。以动物为载体进行手法研究的最大优势是能够获得干预后的组织标本，基于组织标本探讨手法对颈部组织微环境及中枢神经系统的影响，但如何在实验动物模型上合理实现手法操作的模拟是这一研究方式面临的主要瓶颈问题[16]。基于对中医手法操作力学特征与实验动物颈部组织学特征的分析研制手法模拟机器人、机械臂或力学手套等设备，能够在保证干预措施同一性的同时最大限度地保障手法操作特征的模拟，是现阶段中医手法疗效机制研究（动物实验）瓶颈问题的解决方案之一：林志刚等[17]通过 Grip 系统无线触觉力测量指套对大鼠穴位进行定量性点法刺激用于模拟推拿手法中的点法和按法，结合大鼠坐骨神经痛模型，通过一系列相关动物实验验证了 P2X3 蛋白与大鼠慢性压迫背根神经节模型中疼痛信号传递、强化外周敏化的相关性，并在此基础上验证了该指套模拟的点法、按法能够在一定程度逆转神经病理性疼痛引起的背根神经节 P2X3 蛋白水平升高和 Piezo1 蛋白水平降低，为推拿手法治疗神经根受压时发挥的外周镇痛作用提供了相关证据[17-19]；该团队还采用该设备对推拿手法治疗神经根受压疾病的机制进行了深入研究，从抑制脊髓星形胶质细胞增殖、缓解外周软组织炎性微环境浸润等多个维度证实了推拿手法的中枢、外周镇痛机制[20-21]；哈佛大学 SEO 等[22]为研究骨骼肌损伤开发设计了一套以电磁效应器、力传感器组件为核心的手法模拟设备，用该设备下臂的硅胶口将小鼠的体位固定，并通过力传感器设定一定的刺激量实现机械刺激的统一化，此外，该设备还可附带高频超声传感器，对设备干预的小鼠背部肌肉进行实时超声成像，分析干预对小鼠肌肉组织的即刻效应。该团队以此机器人为干预方式，验证了在特定力度范围内的循环压缩负荷能够显著促进小鼠骨骼肌修复，提示手法治疗对肌肉修复功能的潜在调节效应；ZHOU 等[23]研制了包含动力系统和指标调控系统的推拿手法模拟仪用于手法机制研究，能够在实验动物模型上完成点法、振法、拍法、揉法、拨法 5 种中医传统推拿手法，并在其基础上以一系列的动物实验深入分析了以上中医手法缓解坐骨神经痛[24-25]、退热[26-27]等治疗效应的作用机制。

以上研究均通过推拿手法模拟设备在动物实验中实现了中医推拿手法干预的模拟，在此基础上开展的研究能够深入探讨手法干预的作用机制，从分子层面挖掘手法干预的潜在效应。但目前，该类设备多聚焦于放松类手法的模拟，而对于骨科临床更为常用的扳动类手法，目前仍缺乏有效的模拟手段。如何实现扳动类手法的模拟，深入挖掘扳动类手法的效应机制仍是目前手法干预面临的瓶颈问题之一。

3 软件工程技术的应用

除通过设备实现外，推拿手法的力学效应还能够通过力学分析设备拆解并通过软件复现实现。生物力学软件技术的进步，使中医传统手法的数字化分析成为了可能，该方法不仅解决了扳动类手法难以通过仪器实现模拟的瓶颈问题，还能用于实现手法效应分析和力学特征的数字化、图像化处理，是近年来手法生物力学效应机制研究的主要手段之一。

三维有限元分析技术是把一个连续体划分为由有限个单位构成的离散化模型，以此替代原有的物体，根据原有物体的几何材料特性以及受力条件采用不同的单元种类，单元之间用节点相连接，通过能量原理并借助位移法的解题思路，采取矩阵代数表达式的数值法[28]是目前生物力学研究的主要方法，较之在体研究具有成本低、风险低等优势。以比利时 Materialise 公司研发的 MIMICS 软件、美国 Geomagic 公司研发的 Geomagic studio 软件、法国 Dassault Systemes 公司研发的 Solidwork 软件与 Abaqus 软件等为代表的力学分析软件是医学有限元分析的核心技术，上述软件通过影像学图像资料中物体的密度差异形成图像，以“Mask”功能及多图层连接形成三维模型，通过对模型结构赋予“杨氏模量（Young's Modulus）”“弹性模量（Elastic Modulus）”“泊松比”等材料属性赋值实现解剖结构数字化，并通过力学加载实现手法效应的模拟。如 XUE 等[29]通过构建全颈段含脊髓颈椎有限元模型并施加颈椎旋转扳法力学数据的方式验证了由冯天有创立的颈椎旋转复位法[30]操作对脊髓造成损伤的可能性很低，明确了该手法作用于颈椎各组成部分的力学特征，并在后续研究中通过该方法进一步证实了对于后纵韧带骨化患者使用颈椎旋转扳法存在一定的脊髓损伤风险[31]；CAO 等[32]通过构建颈 3 至颈 7 节段有限元模型验证了三维平衡手法在治疗神经根型颈椎病过程中发挥的生物力学效应，明确了其疗效和安全性。此外，还有许多类似的研究[33-35]采用该方法明确了不同类型扳动类手法的生物力学效应。当然，该方法也存在一些技术性问题：大多数研究颈部组织结构的材料属性赋值来源于文献报道，而文献中的相关指标多来源于尸体标本，肌肉、筋膜等组织结构在活体组织与尸体标本中存在显著差异，

会在一定程度上影响仿真效果。

虚拟现实互动技术[36]是一种综合应用各种技术制造逼真的人工模拟环境，并能有效模拟人在自然环境中各种感知系统行为的高级人机交互技术。该技术结合动态捕捉系统、三维图像重建系统、动态模拟系统等技术，能够动态还原手法操作过程中模型各结构的运动轨迹。刘广伟等[37]通过虚拟现实互动技术动态还原了颈椎旋提手法操作过程中颈椎各椎间孔形态与面积变化过程，明确了旋提手法通过增大下颈椎间孔可能有助于松解椎间孔周缘的粘连，从而缓解神经根刺激症状，并证明了 150 N 是旋提手法操作最为适宜的提扳力度。该技术的主要优势是实现了手法操作过程中相关解剖结构的动态还原，有较大的应用潜力。

肌张力云图技术是将多点肌张力测试、软组织张力测试系统与 MATLAB 工程软件相结合，从整体评估手法治疗前后颈背部肌张力分布差异的方法，较之传统的单点肌张力测试[38]能够更为全面、更为直观地反映手法对颈背部肌张力的影响。梁龙[39]、王旭[40]通过该方法分别评估了颈椎康复操、颈椎旋提手法治疗前后神经根型颈椎病患者颈背部肌张力的整体变化，证实了颈椎康复操、颈椎旋提手法能够降低患者颈背部肌张力、平衡患侧健侧肌张力的效应。

以上研究均是软件工程领域技术成果在中医手法效应机制研究领域的应用，相关软件在中医推拿手法的生物力学效应、手法对相关解剖结构对的形态学影响、手法对颈部软组织张力的影响等方面应用广泛，仍有一定的应用前景。但软件数字化仿真技术所构建的模型本身是一个十分复杂的数字模型，赋予不同的材料性质、边界条件、网格密度和数值解等一系列操作均可以显著地改变力学指标的输出[41]，且数据复杂性的增加势必导致仿真程度的下降，如何克服相关软件的现有缺陷，尽可能增强数字模型的仿真度仍是研究人员需要面临的主要问题。

4 神经工程及神经影像学技术的应用

神经工程学是 21 世纪的一大新兴学科，旨在运用神经科学和工程学方法来理解、修复、替换、增强或开发神经系统的特性，以及设计与神经限制和功能障碍相关问题的解决方案[42]，探索神经系统功能是该学科的重要一环。随着近年来相关研究的持续深入，许多用于神经功能研究的设备应运而生，使无创探索中枢神经系统功能成为了可能，也为深入挖掘外在干预的神经信号传递过程，探索针刺、手法等非药物疗法的效应机制提供了新思路。

功能核磁共振技术（functional Magnetic Resonance Imaging，fMRI）是一种可用于描述由任务诱导或自发调节神经代谢引起的脱氧血红蛋白浓度变化的脑功能成像技术[43]，旨在显示脑代谢区域并能实时分析其变化，且具有广泛的实用性（可在临床常用的 1.5T 核磁共振扫描仪上进行）、非侵入性（不需要放射性同位素或其他药物）、良好的空间分辨率等特征，是目前神经影像学研究的主要手段。DIDEHDAR 等[44]研究发现，脊柱扳动手法（spinal manipulation therapy，SMT）操作后慢性非特异性腰痛患者丘脑、岛叶、背外侧前额叶皮质区域的 N- 乙酰天冬氨酸以及丘脑、岛叶和躯体感觉皮质区域的胆碱水平与假手法组患者有显著差异，提示脊柱扳动手法通过改变丘脑、岛叶等脑区大脑代谢物生成实现抑制疼痛信号产生，达到缓解患者症状的效果；YANG 等[45]通过观察脊柱扳动手法治疗前后、即刻与远期的 fMRI 成像结果发现，患者双侧楔前叶和右侧额中回的成像区域均匀性（regional homogeneity，Reho）有显著变化，提示腰痛患者可出现脑神经功能活动改变，手法治疗后可明显改善，而左侧楔前叶的 Reho 值可以预测手法的即时镇痛作用，评估手法镇痛效果；MOSER 等[46]通过对比颈椎旋转手法操作角度差异对脑血流动力学的改变发现，在手法操作中将患者头部旋转至最大角度后，后脑和小脑的功能连接显著增加。国内也有许多相关研究[47-49]通过该技术验证了中医手法效应在中枢神经系统中的反应，该技术的普及和广泛应用将物理治疗与脑科学相联系，建立了阐释手法治疗效应机制的又一途径，随着脑科学、神经工程技术的进步，手法的中枢效应有望进一步被阐明。

此外，脑电图也是探究手法治疗脊柱退行性疾病效应机制的手段之一，且脑电设备可以在手法操作过程中持续测量，在记录手法中枢效应的连续性方面具有一定优势：NAVID 等[50]通过 61 通道脑电图记录脊柱手法干预前后亚临床疼痛志愿者的脑电变化，发现脊椎按摩可能会改变疼痛和不愉快感受的中枢处理；GEVERS-MONTORO 等[51]通过辣椒素刺激健康志愿者背部并使用脑电图记录脊柱手法治疗前后疼痛阈值及脑电变化，发现应用辣椒素的志愿者出现了明确的疼痛过敏，而脊柱手法治疗后疼痛过敏消失，并捕捉到了志愿者额叶高伽马振荡，提示节段性的脊柱手法可以预防继发性痛觉过敏；另一项类似的研究[52]采用激光热源给予痛觉刺激，同样采用脑电图进行痛觉信号捕捉，初步探究了痛觉敏化下降与 Aδ 纤维、C- 纤维抑制具有潜在相关性。目前此类研究主要聚焦于脊柱手法的中枢镇痛机制探索，但对于中医手法治疗效应机制方面应用较少，有一定的应用潜力。

神经工程与神经影像学技术的应用是对中医手法治疗脊柱退行性疾病效应机制研究方法的有力补充。结合脑科学的研究进展，从中枢角度探讨手法治疗脊柱退行性疾病疗效机制将成为未来重点关注的方向之一。

5 人工智能技术的应用潜力

人工智能技术是一门以研究、开发用于模拟、延伸和扩展人的智能的理论、方法、技术及应用系统的全新技术科学[53]。人工智能技术在图像识别、深度学习、神经网络、机器人开发等关键技术环节的迅速发展对多学科交叉融合进程起到了极大地推动作用。目前，已有许多手法相关的研究通过人工智能相关技术实现了突破，主要体现在智能化手法模拟设备的开发应用、算法强化机器人手法治疗方案选择等方面：杨羚等[54]通过基于人工智能机械臂 Dobot Magician 学习模拟一指禅手法比较了该手法对家兔和受试者软组织的压力感知函数关系，为手法在实验动物模型上的“等量－等效”模拟提供了方法参考；有研究采用生物力学探测机器人[55-57]在新鲜猪尸体 L3/L4 节段探测并智能还原了腰部大鱼际推法的力学效应变化过程，分别分析了该手法对腰部肌肉及脊髓的应力变化，该研究方法也有在颈部手法研究应用的潜力。

事实上，基于人工智能技术、遗传算法等技术手段研发的手法机器人层出不穷[58-61]。相较于第一部分提及的力学手套、手法模拟仪等设备，智能化手法模拟机器人能够自主完成干预过程，直接生成结局指标或图像，极大促进了手法应用的基础研究及效应机制研究的发展。但目前，这类人工智能机器人主要聚焦于较为安全的放松类手法，扳动类正骨手法机器人的开发仍存在诸多伦理问题与临床问题。

另外，人工智能加持下的计算机算法在影像资料指标筛选、潜在作用通路筛查、作用靶点预测等方面具有诸多优势，在手法治疗效应机制探索方面同样具有应用价值：如影像组学技术[62]、重复增量修剪算法（RIPPER）[63]等。但目前上述技术在手法研究领域的应用较少，尚未形成较公认的研究体系。

6 小结与展望

脊柱退行性疾病是中医治疗优势病种，作为中医药非药物疗法的代表之一，中医正骨疗法是治疗颈椎病的重要手段，已在 2006 年已被列为首批国家非物质文化遗产（编号为：IX-6），并在长期实践中形成了一套独特的理论体系和具有自身特色的诊疗方案。但在目前医学研究标准化、现代化、国际化的大趋势下，如何通过更科学的研究方法联合现代化的仪器设备，进一步深层次阐释中医手法治疗脊柱退行性疾病的效应机制，成为了中医手法研究从业人员面临的主要问题。

既往手法研究更多的重视手法的临床疗效与力学特征解析，并在此基础上衍生出了手法操作标准化、手法数字化教学传承模式探索等研究方向，但对于多学科交叉视角下手法科学内涵的深层阐释与效应机制现代化分析的重视程度仍不足，导致了中医手法治疗虽临床应用广泛却难以实现国际化认同的现状[64]。在“医工结合”研究模式愈发普及的当下，现代科学技术为当代中医手法从业者提供了诸多全新的研究方法与研究思路，标准化的手法干预模拟、数字化可视化的手法效应分析、动态化的手法操作流程还原解析均已成为可能。正确的选择研究方法与研究技术，促进传统中医手法研究的现代化进程与国际化推广，是“十四五”期间中医手法从业者的主要工作目标。结合现有研究现状，笔者团队认为，在目标手法临床疗效研究及生物力学研究的基础上，通过保证质量控制的可靠手法模拟设备实现手法效应机制的基础研究，深入挖掘手法治疗脊柱退行性疾病的神经－体液－免疫效应机制，并通过相关的神经工程技术及神经影像学技术阐释手法的中枢效应机制，从多个维度丰富中医手法的科学内涵，将是下一阶段手法效应机制研究的主要工作方向。

作者贡献：王旭负责文章的构思与设计、研究资料的收集与整理、论文撰写；冯天笑负责论文修订；魏戌、朱立国负责文章的质量控制及审校、对文章整体负责，监督管理；王志鹏、师彬负责提供相关研究技术支持与解读。

本文无利益冲突。

参考文献

[1] IMAGAMA S，ANDO K，KOBAYASHI K，et al. Multivariate analysis of factors related to the absence of musculoskeletal degenerative disease in middle-aged and older people [J]. Geriatr Gerontol Int，2019，19（11）：1141-1146. DOI：10.1111/ggi.13786.

[2] SAFIRI S，KOLAHI A A，HOY D，et al. Global，regional，and national burden of neck pain in the general population，1990-2017：systematic analysis of the Global Burden of Disease Study 2017 [J]. BMJ，2020，368：m791. DOI：10.1136/bmj.m791.

[3] SHENG C，CHEN M J，WU X H，et al. Global，regional and national burden of low back pain 1990-2019：a systematic analysis of the Global Burden of Disease study 2019 [J]. J Orthop Transl，2022，32：49-58. DOI：10.1016/j.jot.2021.07.005.

[4] KIM J，RYU H，KIM T H. Early reoperation rates and its risk factors after instrumented spinal fusion surgery for degenerative spinal disease：a nationwide cohort study of 65，355 patients [J]. J Clin Med，2022，11（12）：3338. DOI：10.3390/jcm11123338.

[5] THOOMES E，THOOMES-DE GRAAF M，CLELAND J，et al. Timing of evidence-based non-surgical interventions as part of multimodal treatment guidelines for the management of cervical radiculopathy：a Delphi study protocol [J]. BMJ Open，2021，11（3）：e043021. DOI：10.1136/bmjopen-2020-043021.

[6] ZHU L G，WEI X，WANG S Q. Does cervical spine manipulation reduce pain in people with degenerative cervical radiculopathy? A systematic review of the evidence，and a meta-analysis [J]. Clin Rehabil，2016，30（2）：145-155. DOI：10.1177/0269215515570382.

[7] WEI X，WANG S Q，LI J X，et al. Complementary and alternative medicine for the management of cervical radiculopathy：an overview of systematic reviews［J］. Evid Based Complement Alternat Med，2015，2015：793649. DOI：10.1155/2015/793649.

[8] BLANPIED P R，GROSS A R，ELLIOTT J M，et al. Neck pain：revision 2017［J］. J Orthop Sports Phys Ther，2017，47（7）：A1-83. DOI：10.2519/jospt.2017.0302.

[9] CARREON L Y，ANDERSON P A，TRAYNELIS V C，et al. Cost-effectiveness of single-level anterior cervical discectomy and fusion five years after surgery［J］. Spine：Phila Pa，1976，2013，38（6）：471-475. DOI：10.1097/brs.0b013e318273aee2.

[10] 王一镗，田晶 . 着力绘制发展我国“医工结合”的蓝图［J］. 中华急诊医学杂志，2014，23（1）：6-7. DOI：10.3760/cma.j.issn.1671-0282.2014.01.003.

[11] 杨志威，冯国斌 . 安全中医按摩机器人臂系统研究［J］. 中国设备工程，2021（24）：29-30. DOI：10.3969/j.issn.1671-0711.2021.24.018.

[12] 陈亮亮 . 颈椎康复按摩机器人设计及柔顺控制研究［D］. 哈尔滨：哈尔滨工程大学 .

[13] 张明亮，石志新，罗玉峰，等 . 中医推拿机器人末端执行器的结构设计与分析［J］. 机械传动，2020，44（6）：73-77，83. DOI：10.16578/j.issn.1004.2539.2020.06.013.

[14] 霍路遥，符碧峰，冯天笑，等 . 颈椎旋提手法教学机器人用于旋提手法规范化培训的自身对照研究［J］. 中国中医骨伤科杂志，2021，29（5）：6-11. DOI：10.3969/j.issn.2095-4174.2019.11.016.

[15] 冯敏山，朱立国，王尚全，等 . 颈椎旋提手法教学机器人的稳定性研究［J］. 中国骨伤，2017，30（3）：241-246. DOI：10.3969/j.issn.1003-0034.2017.03.011.

[16] 魏戌，王旭，孙凯，等 . 中医手法治疗颈椎病的研究现状与展望［J］. 中华中医药杂志，2020，35（10）：4781-4784. DOI：10.3969/j.issn.2095-4344.0579.

[17] 林志刚，蒋诗超，程艳彬，等 . 推拿对腰椎间盘突出症大鼠 DRG 神经元 P2X3 受体影响的实验研究［J］. 中华中医药学刊，2017，35（10）：2475-2479. DOI：10.13193/j.issn.1673-7717.2017.10.002.

[18] 林志刚，陈水金，陈乐春，等 . 推拿按揉法对神经病理痛大鼠的镇痛作用及对血清、背根神经节及脊髓背角 P 物质的影响[J]. 中华中医药学刊，2019，37（4）：877-880. DOI：10.13193/j.issn.1673-7717.2019.04.024.

[19] 吴志伟，宋朋飞，朱清广，等 . 推拿对坐骨神经慢性压迫损伤模型大鼠脊髓背角星形胶质细胞的影响［J］. 中华中医药杂志，2022，37（6）：3462-3466. DOI：10.3969/j.issn.1007-3205.2018.09.026.

[20] YAO C J，REN J，HUANG R X，et al. Transcriptome profiling of microRNAs reveals potential mechanisms of manual therapy alleviating neuropathic pain through microRNA-547-3p-mediated Map4k4/NF-κb signaling pathway［J］. J Neuroinflammation，2022，19（1）：211. DOI：10.1186/s12974-022-02568-x.

[21] YAO C J，GUO G X，HUANG R X，et al. Manual therapy regulates oxidative stress in aging rat lumbar intervertebral discs through the SIRT1/FOXO1 pathway［J］. Aging（Albany NY），2022，14（5）：2400-2417. DOI：10.18632/aging.203949.

[22] SEO B R，PAYNE C J，MCNAMARA S L，et al. Skeletal muscle regeneration with robotic actuation-mediated clearance of neutrophils［J］. Sci Transl Med，2021，13（614）：eabe8868. DOI：10.1126/scitranslmed.abe8868.

[23] ZHOU Y，ZHANG Y M，ZHANG X Y，et al. Safety of five Tuina manipulations in rats with deep vein thrombosis［J］. Evid Based Complement Alternat Med，2021，2021：6897124. DOI：10.1155/2021/6897124.

[24] 吕桃桃，杨超，于天源，等 . 三法三穴对坐骨神经损伤大鼠下行性通路超微结构的影响[J]. 中华中医药杂志，2019，34(11)：5112-5116.

[25] 吕桃桃，邵帅，于天源，等 . 基于 RNA 测序技术分析推拿对大鼠坐骨神经损伤点的基因表达影响［J］. 中华中医药杂志，2020，35（5）：2589-2592.

[26] 张英琦，刘志凤，于天源，等 . 推拿退热六法对脂多糖致热幼兔下丘脑 COX-2/PGE2/EP3 信号通路的影响［J］. 北京中医药大学学报，2022，45（11）1160-1167. DOI：10.3969/j.issn.1006-2157.2022.11.009.

[27] 刘志凤，张英琦，于天源，等 . 小儿推拿退热六法对脂多糖致热幼兔下丘脑的代谢组学研究［J］. 中华中医药杂志，2022，37（5）：2645-2650. DOI：10.3969/j.issn.1674-1749.2022.02.005.

[28] WELCH-PHILLIPS A，GIBBONS D，AHERN D，et al. What is finite element analysis?［J］. Clin Spine Surg，2020，33：323-324. DOI：10.1097/BSD.0000000000001050.

[29] XUE F，CHEN Z J，YANG H，et al. Effects of cervical rotatory manipulation on the cervical spinal cord：a finite element study［J］. J Orthop Surg Res，2021，16（1）：737. DOI：10.1186/s13018-021-02885-6.

[30] 冯天有 . 中西医结合治疗软组织损伤的临床研究［M］. 北京：中国科学技术出版社，2002.

[31] XUE F，DENG H，CHEN Z J，et al. Effects of cervical rotatory manipulation on the cervical spinal cord complex with ossification of the posterior longitudinal ligament in the vertebral canal：a finite element study［J］. Front Bioeng Biotechnol，2023，11：1095587. DOI：10.3389/fbioe.2023.1095587.

[32] CAO S N，CHEN Y Z，ZHANG F，et al. Clinical efficacy and safety of “three-dimensional balanced manipulation” in the treatment of cervical spondylotic radiculopathy by finite element analysis［J］. Biomed Res Int，2021，2021：5563296. DOI：10.1155/2021/5563296.

[33] GUO X，ZHOU J M，TIAN Y Y，et al. Biomechanical effect of different plate-to-disc distance on surgical and adjacent segment in anterior cervical discectomy and fusion - a finite element analysis［J］. BMC Musculoskelet Disord，2021，22（1）：340. DOI：10.1186/s12891-021-04218-4.

[34] ZHOU J M，GUO X，KANG L，et al. Biomechanical effect of C5/C6 intervertebral reconstructive height on adjacent segments in anterior cervical discectomy and fusion - a finite element analysis［J］. Orthop Surg，2021，13（4）：1408-1416. DOI：10.1111/os.13010.

[35] HUANG X C，YE L Q，WU Z X，et al. Biomechanical effects of lateral bending position on performing cervical spinal manipulation for cervical disc herniation：a three-dimensional finite element analysis［J］. Evid Based Complement Alternat Med，2018，2018：2798396. DOI：10.1155/2018/2798396.

[36] 穆琳，裴昀，李叶，等 . 虚拟现实和增强现实技术在《医学影像学》教学中的研究与应用进展［J］. 中华医学教育探索

杂志，2021，20（9）:947-950. DOI：10.3760/cma.j.cn116021-20200531-00601.

[37] 刘广伟，冯敏山，朱立国，等. 基于虚拟现实技术的旋提手法下颈椎间孔结构变化动态分析［J］. 中国组织工程研究，2023，27（9）:1346-1351. DOI：10.12016/j.issn.2096?1456.2022.01.008.

[38] 陈伟健，陈泽华，吴佳涛，等. 新型肌肉定量评估仪评估神经根型颈椎病患者两侧肩颈肌肉的性能失衡［J］. 中国组织工程研究，2022，26（3）：430-434.

[39] 梁龙. 颈椎康复操对神经根型颈椎病的干预作用及机制研究［D］. 北京：中国中医科学院.

[40] 王旭. 基于软组织张力及有限元技术的旋提手法治疗神经根型颈椎病机制研究［D］. 北京：中国中医科学院.

[41] LAGRAVÈRE M. Finite element analysis：is it justifiable?［J］. Am J Orthod Dentofacial Orthop，2021，159（3）：255-256. DOI：10.1016/j.ajodo.2020.10.017.

[42] EREIFEJ E S，SHELL C E，SCHOFIELD J S，et al. Neural engineering：the process，applications，and its role in the future of medicine［J］. J Neural Eng，2019，16（6）：063002. DOI：10.1088/1741-2552/ab4869.

[43] GLOVER G H. Overview of functional magnetic resonance imaging［J］. Neurosurg Clin N Am，2011，22（2）：133-139，vii. DOI：10.1016/j.nec.2010.11.001.

[44] DIDEHDAR D，KAMALI F，YOOSEFINEJAD A K，et al. The effect of spinal manipulation on brain neurometabolites in chronic nonspecific low back pain patients：a randomized clinical trial［J］. Ir J Med Sci，2020，189（2）：543-550. DOI：10.1007/s11845-019-02140-2.

[45] YANG Y C，ZENG K，WANG W，et al. The changes of brain function after spinal manipulation therapy in patients with chronic low back pain：a rest BOLD fMRI study［J］. Neuropsychiatr Dis Treat，2022，18：187-199. DOI：10.2147/NDT.S339762.

[46] MOSER N，MIOR S，NOSEWORTHY M，et al. Effect of cervical manipulation on vertebral artery and cerebral haemodynamics in patients with chronic neck pain：a crossover randomised controlled trial［J］. BMJ Open，2019，9（5）：e025219. DOI：10.1136/bmjopen-2018-025219.

[47] 郭光昕，朱清广，徐善达，等. 基于脑功能磁共振成像技术探讨中医推拿镇痛脑机制［J］. 中华中医药杂志，2020，35（12）：6268-6271. DOI：10.3969/j.issn.1001-6910.2019.01.28.

[48] 杨玉婵，谭文莉，王炜，等. 慢性腰痛推拿治疗前后默认脑网络功能连接变化研究［J］. 中国医学计算机成像杂志，2020，26（2）：101-108. DOI：10.3969/j.issn.1006-5741.2020.02.001.

[49] 郭汝松，黄帆，黄楚渝，等. 岭南林氏正骨手法对枕大神经痛患者静息态功能磁共振低频振幅作用研究［J］. 广州中医药大学学报，2021，38（1）：109-115. DOI：10.13359/j.cnki.gzxbtcm.2021.01.021.

[50] NAVID M S，LELIC D，NIAZI I K，et al. The effects of chiropractic spinal manipulation on central processing of tonic pain - a pilot study using standardized low-resolution brain electromagnetic tomography （sLORETA）［J］. Sci Rep，2019，9：6925. DOI：10.1038/s41598-019-42984-3.

[51] GEVERS-MONTORO C，PROVENCHER B，NORTHON S，et al. Chiropractic spinal manipulation prevents secondary hyperalgesia induced by topical capsaicin in healthy individuals［J］. Front Pain Res （Lausanne），2021，2：702429. DOI：10.3389/fpain.2021.702429.

[52] PROVENCHER B，NORTHON S，GEVERS MONTORO C，et al. Effects of chiropractic spinal manipulation on laser-evoked pain and brain activity［J］. J Physiol Sci，2021，71（1）：20. DOI：10.1186/s12576-021-00804-2.

[53] LOEB G E. Developing intelligent robots that grasp affordance［J］. Front Robot AI，2022，9：951293. DOI：10.3389/frobt.2022.951293.

[54] 杨羚，王继红，高一城，等. 基于人工智能机械臂探讨一指禅推法人-兔手法压力参数的关系［J］. 广州中医药大学学报，2021，38（10）：2231-2235. DOI：10.13359/j.cnki.gzxbtcm.2021.10.031.

[55] FUNABASHI M，NOUGAROU F，DESCARREAUX M，et al. Does the application site of spinal manipulative therapy alter spinal tissues loading?［J］. Spine J，2018，18（6）：1041-1052. DOI：10.1016/j.spinee.2018.01.008.

[56] FUNABASHI M，NOUGAROU F，DESCARREAUX M，et al. Spinal tissue loading created by different methods of spinal manipulative therapy application［J］. Spine （Phila Pa 1976），2017，42（9）：635-643. DOI：10.1097/BRS.0000000000002096.

[57] FUNABASHI M，KAWCHUK G N，VETTE A H，et al. Tissue loading created during spinal manipulation in comparison to loading created by passive spinal movements［J］. Sci Rep，2016，6：38107. DOI：10.1038/srep38107.

[58] DESCARREAUX M，NOUGAROU F，DUGAS C. Standardization of spinal manipulation therapy in humans：development of a novel device designed to measure dose-response［J］. J Manipulative Physiol Ther，2013，36（2）：78-83. DOI：10.1016/j.jmpt.2012.12.007.

[59] ALAVANDAR S，SUNDARAM K，NIGAM M. Geneticalgorithm based robot massage［J］. Journal of Theoretical and Applied Information Technology，2007，3（4）：102-109.

[60] WANG W D，ZHANG L，LI J Z，et al. The force control and path planning of electromagnetic induction-based massage robot［J］. Technol Health Care，2017，25（S1）：275-285. DOI：10.3233/THC-171331.

[61] LI C X，FAHMY A，LI S X，et al. An enhanced robot massage system in smart homes using force sensing and a dynamic movement primitive［J］. Front Neurorobot，2020，14：30. DOI：10.3389/fnbot.2020.00030.

[62] 庄明辉. 基于"筋骨平衡"理念探讨颈椎失稳的影像组学模型构建及其应用研究［D］. 北京：中国中医科学院.

[63] 罗晓舟，李克嵩，张宾，等. 借助人工智能技术探讨足三里循经传导效应产生的影响因素［J］. 中国针灸，2018，38（10）：1105-1108. DOI：10.13703/j.0255-2930.2018.10.019.

[64] 魏戌，韩涛，孙凯，等. 中医药防治骨与关节退行性疾病的优势、关键问题及研究策略［J］. 中国全科医学，2021，24（35）：4421-4426.. DOI：10.12114/j.issn.1007-9572.2021.01.032.

（收稿日期：2023-02-14；修回日期：2023-05-05）

（本文编辑：崔莎）